

대수층 축열 에너지 활용 모델의 온도 분포 시뮬레이션 연구

심 병원¹⁾, 송 윤호²⁾

A study of the simulation of thermal distribution in an aquifer thermal energy storage utilization model

Byoungohan Shim, Yoonho Song

Key words : Aquifer Thermal Energy Storage (ATES), heat pump, thermohydraulic, FEFLOW, thermal interface

Abstract : Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) system can be very cost-effective and renewable energy sources, depending on site-specific parameters and load characteristics. In order to develop an ATES system which has certain hydrogeological characteristics, understanding of the thermohydraulic processes of an aquifer is necessary for a proper design of an aquifer heat storage system under given conditions. The thermohydraulic transfer for heat storage is simulated using FEFLOW according to two sets of pumping and waste water reinjection scenarios of heat pump operation in a two layered confined aquifer. In the first set of model, the movement of the thermal front and groundwater level are simulated by changing the locations of injection and pumping well in seasonal cycle. However, in the second set of model the simulation is performed in the state of fixing the locations of pumping and injection well. After 365 days simulation period, the temperature distribution is dominated by injected water temperature and the distance from injection well. The small temperature change is appears on the surface compared to other slices of depth because the first layer has very low porosity and the transfer of thermal energy are sensitive at the porosity of each layer. The groundwater levels and temperature changes in injection and pumping wells are monitored to validate the effectiveness of the used heat pump operation method and the thermal interference between wells is analyzed.

1. 서론

지열거동 모델링은 현장 열물성 측정 자료나 실증 실험에 의한 지열펌프 시스템의 성능 입증 을 위한 과정으로서 경제적인 설계를 위하여 필수적이다. 일반적으로 모델링에 의한 설계와 실제 시스템 운영간에 대한 차이가 있을 수 있으나, 현장에 대한 실증실험과 시스템 운영의 경험을 이용한다면 지열 거동 모델링은 최적화된 시스템을 구성하는데 매우 유용하다. 지열 활용을 위한 최적의 시스템을 설치하기 위해서는 이용 목적에 적절한 개념모델을 설정하고 대상 지역 전체의 수리력(hydrologic)인 범위에 대한 이론적인 가정과 적용이 필요하다. 수치모델링은 지질, 지하수 부존 형태, 암석 및 토양의 물성 등 여러가지 불확실성에 의해 발생하는 복잡한 문제에 대하여 다양하고 융통성 있는 해를 제공할 수 있다¹⁾. 천부 지열 활용을 위한 열거동 모델링은 지표와 인접한 포화대나 비포화대의 지열변화를 해석하기 위한 것으로서, 일반적으로 심부 지열 거동 모델

링보다 정밀한 해석이 요구된다. 천부 지열 거동에 대한 모델링에서 이용되고 있는 코드(code)는 특정 목적에 맞는 여러가지가 개발되어 있으며, 다양한 천부 지열 활용 분야에 적용되어 왔다²⁾. 본 연구에서는 FEFLOW 모델⁷⁾을 이용하여 대수층 축열 활용 모델에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 열거동 모델링 이론

대수층 축열을 이용한 지열펌프 활용에 의한 지반내 열거동 해석을 위해서는 지하수의 부존 형태 및 유동 특성을 파악하는 것이 중요하다. 특히 열전도도와 열확산율은 매질의 함수율에 따라

-
- 1) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : boshim@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3055 Fax : (042)863-9404
 - 2) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : song@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3175 Fax : (042)863-9404

크게 달라지며⁸⁾, 그에 따른 입력변수에 의하여 모델링 결과가 큰 차이를 나타낼 수 있다. 열적 거동 현상은 지하수의 유동에 많은 영향을 받으며, 지질학적 불균질성이나 층의 두께 등 여러가지 지질형태에도 밀접한 관계를 가진다. 또한 모델링을 위한 경계조건, 입력변수 및 정상류와 부정류 시스템의 조건을 어떻게 설정하는가에 따라서도 다양한 결과를 나타낼 수 있다.

일반적인 지반내 열적 거동은 첫째, 지하수 유동에 의한 대류(convection), 둘째 매질을 통한 전도(conduction), 그리고 셋째, 매질의 불균질성에 의한 분산(dispersion)을 통하여 전달된다. 포화된 매질에서의 열 유량 또는 열 유속(heat flux, $J/(m^2 \cdot s)$)은 다음과 같다⁹⁾.

$$J_{(i)} = n c_w \rho_w v_i (T - T_0) - \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - n c_w \rho_w D_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

여기서, n 는 공극율(porosity), c_s , c_w 는 고체와 물의 비열(specific heat, $J/(kg \cdot K)$), v_i 는 지하수의 평균 속도(average linear groundwater velocity vector, m/s), D_{ij} 는 수리동역학적 분산텐서(hydrodynamic dispersion tensor, m^2/s), ρ_w , ρ_s 는 물과 고체의 밀도(density, g/cm^3), 그리고 T , T_0 는 온도(temperature, K)와 기준온도(reference temperature, K), λ 는 대수층의 열전도도(aquifer thermal conductivity, $J/(m \cdot s \cdot K)$)이다.

포화된 매질에서 외부나 내부의 열적 유입과 유출이 없는 $\partial v_i / \partial x_i = 0$ 인 경우, 열적 거동 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{v_i}{R} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\frac{\lambda}{c_s \rho_s} + \frac{D_{ij}}{R} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = -n$$

여기서, Q_h 는 유출량(discharge rate, m^3/d), v_i/R 은 열거동 전면(heat front)의 대류속도(convective velocity, m/s), $\lambda/c_s \rho_s$ 는 열전도 계수(heat conduction coefficient), D_{ij}/R 은 열분산 계수(heat dispersion coefficient), 그리고 $R = c_s \rho_s / n c_w \rho_w$ 는 열적 지연계수(thermal retardation coefficient)이다.

3. 방법

3.1 대수층 활용 시스템 모델

지열펌프 이용시 지반내 지열거동을 파악하기 위하여 가상의 대수층을 설정하였으며, 입력변수는 Table 1과 같다. 3차원 모델링을 실시하기 위한

시뮬레이션 구간은 $100(x) \times 100(y) \times 50(z)$ m 크기의 성질이 다른 2 개의 층으로 구성된 모델을 설정하였다(Fig. 1). 상부층과 하부층의 입력변수에서 공극율 이외에는 같은 값을 적용하였으며, 지하수위는 -5 m이다. 수리지질조건은 2 개의 피암층 형태로서 상부층은 1 %의 매우 낮은 공극률을 가진 30 m 두께의 난대수층(aquitard)이며, 하부층은 공극률 20 %를 가진 20 m 두께의 대수층이다. 그리고 지표에서의 경계조건은 두 개의 우물에서 같은 양의 주입과 양수 이외의 지하수 유출이나 유입량은 없으며, 대수층 하부는 불투수층으로 가정하였다.

Table 1. Input parameters for the fluid and aquifer materials

Parameter	Unit	Assigned Value
x ₁ -hydraulic conductivity	m/s	0.0001
z-hydraulic conductivity	m/s	0.00001
storativity	1	0.001
volumetric heat capacity (fluid)	$10^6 J/(m^3 \cdot K)$	42
volumetric heat capacity (solid)	$10^6 J/(m^3 \cdot K)$	2.52
heat conductivity (fluid)	$J/(m \cdot s \cdot K)$	0.65
heat conductivity (solid)	$J/(m \cdot s \cdot K)$	3.0
longitudinal dispersivity	m	5
transverse dispersivity	m	0.5
source(+)/sink(-) of fluid	$J/(m^2 \cdot d)$	0
source(+)/sink(-) of solid	$J/(m^2 \cdot d)$	0
In-transfer rate	$J/(m^2 \cdot K)$	0
Out-transfer rate	$J/(m^2 \cdot K)$	0

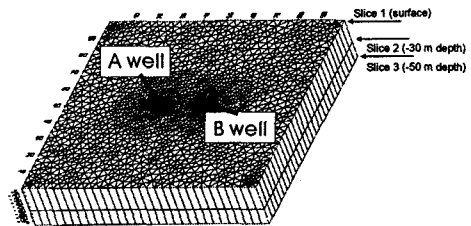


Fig. 1. Schematic diagram of finite element mesh and well locations for ATES system simulation.

전체 시뮬레이션 구간은 6,272 개의 유한요소와 4,887 개의 격자점으로 구성되어 있으며, 삼각프리즘 형태의 유한요소 형태를 이용하였다. 그리고 보다 정밀한 형태의 계산을 가능하게 하고, 오차를 감소시키기 위하여 두 우물 주변의 격자 크

기를 작게 설정하였다. 대수층 축열방식의 지열펌프 이용을 위한 A 우물과 B 우물간 거리는 20 m로 설정하였으며, 스크린은 표고 -30 ~ -50 m 사이에 설치되어 있는 것으로 설정하였다. 열적 경계조건으로 대수층의 초기온도는 16 °C이며, 주입 우물에서 여름에 35 °C와 겨울에 5 °C의 물을 주입하는 것으로 설정하였다.

4. 결과

두 가지 시나리오를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 첫 번째 시나리오는 먼저 여름에 90일간 A 우물에서 50 m³/day의 물을 양수하여 지열펌프에 순환시켜 발생된 35 °C의 지하수를 B 우물에 주입한 후, 주입과 양수를 90일간 중지시킨다. 그리고 겨울에 주입 우물과 양수 우물을 바꾸어 5 °C의 50 m³/day의 물을 90일간 주입하고, 다시 95일간 주입과 양수를 중지시킨 후 대수층내 온도변화를 시뮬레이션 하였다. 실제 봄과 가을 동안에는 지열펌프를 이용하여 급탕과 난방 등 여러 가지 변수가 많으나 대수층 축열 에너지를 위한 기본적인 모델을 시뮬레이션하기 위하여 1년간 전체 지열펌프 작동단계를 단순화시킨 형태를 이용하였다. 두 번째 시나리오는 처음 180일간 첫 번째 방법과 동일한 지열펌프 운영방식을 이용하였으나, 그 이후에는 주입 우물과 양수 우물을 고정시켜 이전과 동일한 양의 5 °C 물을 90일간 주입하고 다시 95일간 주입과 양수를 중지시킨 후 대수층내 온도분포를 시뮬레이션 하였다.

Fig. 2는 첫 번째 시나리오 결과로서 공극율이 매우 작은 slice 1과 2 사이에서 열 거동이 매우 느리게 확산되고 있는 것을 알 수 있으며, slice 2와 slice 3에서는 A 우물과 B 우물주변의 온도분포가 비교적 큰 대조를 보이고 있다. 지표(slice 1)의 온도변화는 매우 미미하게 나타나며, slice 2와 slice 3을 비교하면 부분적으로 약간 역전된 형태의 온도분포를 보인다. 이것은 열적거동이 상부의 난대수층을 통과하는데 따르는 시간이 매우 크기 때문으로 추정된다. 하부대수층에서 주입수에 의한 열적거동이 크게 나타나는 것은 대수층내 열수와 냉수의 주입이 하부대수층에서 이루어지며, 대수층내 공극율이 상부대수층과 매우 큰 차이를 나타내기 때문이다. 그리고 대수층내 함수비에 따라 열전도도와 열확산계수가 급격히 달라지기 때문에 열적거동은 대수층의 특성과 조건에 따라 많은 차이를 나타낼 수 있다⁷⁾. 시뮬레이션 결과 나타난 온도범위는 약 10.0 ~ 21.2 °C 사이로서 대수층의 초기조건 16 °C와는 밑으로 5 °C에서 위로는 7 °C의 차이를 보인다. 그리고 하부대수층에

서 각각 주입 우물 주변의 온도 분포가 주입수의 온도에 따라 지배적인 분포를 가지는 것을 알 수 있다.

우물내 온도변화는 주입 우물에서 열수나 냉수의 주입이 정지되는 순간 급격한 온도 변화를 나타내었으나, 그 후 안정화되면서 시간에 따른 점진적인 온도변화를 보였다. 그리고 양수와 주입에 따라 상대 우물의 온도 변화 곡선의 기울기가 커지는 것으로 나타나며, 주입과 양수에 따라 두 우물간 온도간섭 현상이 거의 같은 시기에 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 두 우물간 거리가 가깝고 대수층의 공극율이 크기 때문인 것으로 판단된다. A와 B 우물의 최종 온도는 10.0과 21.2 °C로서 약 11.2 °C의 온도차가 나타나며, 두 우물의 온도가 시간에 따른 지속적인 큰 차이를 나타내고 있다. 따라서 다음 주기의 운영 사이클에서는 여름철 냉방을 위하여 초기에는 기준온도인 16 °C 보다 6 °C 낮은 지하수를 대수층 축열 에너지로 이용한 지열펌프를 이용할 수 있다.

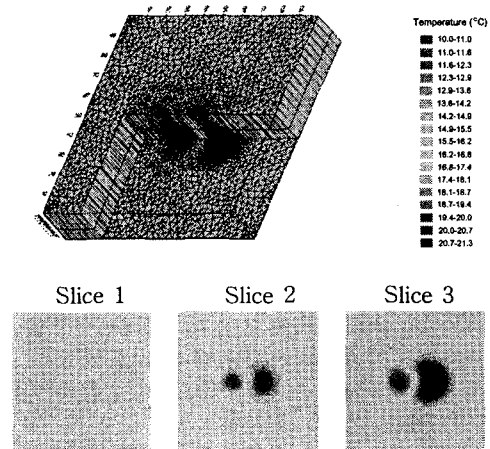


Fig. 2. Simulated temperature distributions according to the ATES system operation with cycling regime method.

두 번째 시나리오의 시뮬레이션 결과는 전체적으로 열적 거동에 의한 온도변화 분포가 Fig. 2보다 넓게 나타나고 있다. 이것은 고정적인 주입과 양수 우물을 설정함으로써 지하수의 유동에 의한 열적 거동이 B 우물에서 다소 넓게 확산된 것으로 판단된다. A와 B 우물에 대한 365일 지열 거동 시뮬레이션 결과 최종 온도는 18.2와 12.3 °C로서, A 우물은 B 우물의 영향에 의한 열적 간섭에 의하여 2.2 °C의 온도가 상승한 것으로 나타났다. 두 우물간 최종 온도차는 5.9 °C이며, 대수층의 초기조건 16 °C와는 약 2 ~ 4 °C 정도의 차이

를 보인다. 따라서 주기적으로 주입 우물과 양수 우물을 교환하여 이용하는 것이 다소 대수층 축열 에너지의 회수율이 높게 나타나는 것으로 판단된다.

5. 결 론

시뮬레이션 결과 열적거동이 공극율이 작은 상부의 난대수층을 통과하는데 따르는 시간이 매우 큰 것으로 나타났으며, 공극율이 상대적으로 큰 하부대수층에서는 주입수에 의한 열적거동이 크게 나타났다. 이것은 대수층의 함수량에 따라 열전도도와 열확산계수가 급격히 달라지기 때문에 열적거동은 대수층의 특성과 조건에 따라 많은 차이를 보이고 있으며, 양수와 주입 방식에 따라 열확산 범위도 크게 차이를 나타내는 것으로 나타났다.

두 우물에서의 수위와 열적 변화를 시뮬레이션한 결과, 대수층에서 양수 우물과 주입 우물을 설정하여 계절별로 바꾸어서 지열펌프를 운용하는 방법에서는 두 우물에서 약 11.2 °C의 온도차가 나타났다(Fig 2). 한편 결과를 그림으로 나타내지는 않았으나, 계절과 상관없이 각각 양수 우물과 주입 우물을 지정하여 양수된 지하수를 지열펌프에 이용후 순환된 물을 대수층으로 재주입하는 방식에서는 두 우물간 최종 온도차는 5.9 °C이며, 대수층의 초기조건 16 °C와는 약 2 ~ 4 °C 정도의 차이를 보였다. 따라서 주기적으로 주입 우물과 양수 우물을 교환하여 이용하는 것이 대수층 축열 에너지의 회수율을 높일 수 있는 것으로 나타났다. 다음 주기의 운영 사이클에서는 여름철 냉방을 위하여 기준온도인 16 °C 보다 약 6 °C 낮은 지하수를 대수층 축열 에너지로 초기에 이용할 수 있는 것으로 나타났다.

국내에서는 지하수가 풍부한 대수층이 발달되어 있는 지역이 많으므로 대수층 축열시스템을 구축하는데 매우 유리하다. 따라서 이러한 지역에서는 고효율 천부 지열 자원을 활용하여 냉난방 시스템을 적용할 수 있다. ATEs 시스템의 경제적인 설계와 구축을 위해서는 현장실험이나 열펌프 운용경험 등과 함께 지하의 온도 변화 예측을 위한 지열 거동 모델링 기술이 요구된다. 본 연구에서는 지열펌프의 운영 시나리오를 이용하여 임의의 대수층내 열적거동을 해석함으로써, 실제 경제적인 시스템을 개발하는데 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

References

- [1] Spitz, K. and Moreno, J., 1996, A practical guide to groundwater and solute transport modeling, John Wiley & Sons Inc., 461.
- [2] Claesson, J., Hellstöm, G., and Probert, T., 1994, Simulation models for ATEs, International symposium of aquifer thermal energy storage, Univ. of Alabama, 131-136.
- [3] Mirza, C., Goutama, M.W., and Lau, K.C., 1994, Developing an expert system for aquifer thermal energy storage, International symposium of aquifer thermal energy storage, Univ. of Alabama, 97-106.
- [4] Palmer, C.D., Blowes, D.W., Frind, E.O., and Molson, J.W., 1992, Thermal energy storage in an unconfined aquifer: 1. Field injection experiment, Water Resources Research, 28, 2857-2867.
- [5] Pruess, K., 1991, TOUGH2 A General Purpose Numerical Simulator for Multiphase Fluid and Heat Flow, Lawrence Berkeley Laboratories, LBL-29400.
- [6] Warner, D.L., and Alagn, U., Thermal impact of residential ground-water heat pump, Ground Water, 22(1), pp. 6-12 (1984).
- [7] Wasy software, 2003, FEFLOW white papers, vol 1. 366.
- [8] 한정상, 한규상, 한혁상, 한찬, 2004, 친환경 대체에너지인 천부 지중열을 이용한 지열펌프 냉난방 시스템, 한림원.
- [9] Molson, J.W., Frind, E.O. and C.D. Palmer, 1992, Thermal energy storage in an unconfined aquifer: 2. Model development, validation and application, Water Resources Research, 28, 2857-2867.